

В.Л. Доброскок, д-р техн. наук, Л.Н. Абдурайимов,
С.И. Чернышов, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИАНГУЛЯЦИОННЫХ 3D МОДЕЛЕЙ ИЗДЕЛИЙ

Розглянуті інтегральні характеристики триангуляційних 3D моделей промислових виробів. Абсолютні інтегральні характеристики представлені наступними групами: лінійні, кутові, поверхневі й об'ємні. Для порівняльної оцінки запропоновані відносні характеристики. Запропоновані інтегральні характеристики являються складовою частиною системи морфологічного аналізу 3D моделей.

Рассмотрены интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей промышленных изделий. Абсолютные интегральные характеристики представлены следующими группами: линейные, угловые, поверхностные и объемные. Для сравнительной оценки предложены относительные характеристики. Предложенные интегральные характеристики являются составной частью системы морфологического анализа 3D моделей.

V.L. DOBROSKOK, L.N. ABDURAJIMOV, S.I. CHERNYSHOV

INTEGRATED CHARACTERISTICS TRIANGULABLE 3D MODELS OF PRODUCTS

Considered the integral characteristics of the triangulation of 3D models of industrial products. Absolute integral characteristics presented by the following groups: linear, angular, surface and volume. For comparative evaluation the relative characteristics proposed. The proposed integral characteristics are a component part of a system of morphological analysis of 3D models.

Постановка проблемы

Использование компьютерных 3D моделей изделий занимает ключевое место в современном машиностроении. Твердотельные модели применяются для решения многих важных задач автоматизации проектирования и технологии изготовления машин и их прототипов. Геометрическая информация о модели является необходимым элементом процессов конструирования и производства [2].

Переход от CAD-модели изделия к триангуляционной осуществляется в системах 3D моделирования с помощью экспорта в STL-формат [1, 5, 13, 14]. STL-файлы представляют собой исходные данные для систем материализации твердотельных моделей генеративными технологиями Rapid Prototyping, анализа конструкции изделия и др.

С развитием интегрированных технологий материализации 3D моделей, появились предпосылки изготовления изделий сложных пространственных форм за достаточно короткие сроки. Оценка геометрической сложности 3D моделей изделий является актуальной проблемой для современного машиностроения. Принятие решений по выбору того или иного способа изготовления (традиционного или генеративного) должно осуществляться на основе оценки сложности изделий, где их геометрические характеристики яв-

ляются определяющими. Себестоимость продукции также в полной мере зависит от сложности изделия и метода его материализации.

Анализ литературы

Проблеме оценки сложности изделий посвящено достаточное количество работ по следующим направлениям:

- оценка степени сложности поверхностей, способы их задания и обработка традиционными технологиями машиностроения [4, 8];
- определение конструктивно-технологической сложности, путем декомпозиции изделия с выделением элементарных поверхностей (конструктивно-технологических элементов) [7];
- оценка сложности конструкции изделия по количеству составных частей или конструктивных элементов [10, 11].

Рассмотренные работы ориентированы на решение технологических задач оценки сложности применительно к традиционным технологиям изготовления. Для работы с триангуляционными моделями, используемыми в интегрированных генеративных технологиях (Rapid Prototyping), необходимо разработать специальные оценки их сложности.

Цель статьи – предложить систему интегральных характеристик триангуляционных 3D моделей изделий и оценить их применимость при решении задач морфологического анализа.

Изложение основного материала

Оценку сложности триангуляционных моделей изделий можно производить на базе различных подходов. Как правило, оценка сложности изделий в традиционной технологии машиностроения осуществляется на базе экспертных оценок специалистами соответствующей предметной области. Такая оценка достаточно субъективна.

В настоящей статье предложены интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей изделий на базе анализа основных их геометрических характеристик и соотношений.

STL-формат (STereoLithography, Surface Tessellation Language или Standard Triangulation Language) на данный момент лидирует среди форматов описания 3D данных [3, 12]. В нем для представления формы и размеров изделия используется триангуляционная модель. Геометрическая адекватность такой модели зависит от погрешности аппроксимации исходной CAD-модели. Уменьшение размеров триангуляционных элементов модели (треугольников) приводит к повышению точности описания. При этом увеличивается количество треугольников, что приводит к увеличению размеров STL-файла.

Рассмотрим интегральные характеристики триангуляционных 3D моделей. Исходными данными STL-файлов являются следующие: общее количество треугольных граней N_{Face} ; координаты вершин триангуляционной модели V_1, V_2, V_3 ; направляющие косинусы нормалей треугольников относительно осей координат N_x, N_y, N_z .

Абсолютные интегральные характеристики могут быть представлены следующими группами: линейные, угловые, поверхностные и объемные.

1. Линейные (координаты вершин)

Линейные интегральные характеристики несут информацию о размерах триангуляционной модели и ее пространственном положении. Они могут быть рассчитаны на основе координат вершин модели.

К абсолютным линейным интегральным характеристикам относятся минимальные x_{min} , y_{min} , z_{min} , максимальные x_{max} , y_{max} , z_{max} значения координат и величины интервалов значений L_X , L_Y , L_Z (стороны описывающего параллелепипеда):

$$\begin{aligned} x_{min} &= \text{MIN}(x_i); & y_{min} &= \text{MIN}(y_i); & z_{min} &= \text{MIN}(z_i); \\ x_{max} &= \text{MAX}(x_i); & y_{max} &= \text{MAX}(y_i); & z_{max} &= \text{MAX}(z_i); \\ L_X &= x_{max} - x_{min}; & L_Y &= y_{max} - y_{min}; & L_Z &= z_{max} - z_{min}. \end{aligned} \quad (1)$$

Относительные линейные интегральные характеристики k_X , k_Y , k_Z имеют область значений $[0, 1]$ и определяются соотношениями:

$$k_X = \frac{x_{min}}{x_{max}}; \quad k_Y = \frac{y_{min}}{y_{max}}; \quad k_Z = \frac{z_{min}}{z_{max}}. \quad (2)$$

2. Угловые (направляющие косинусы нормалей)

Угловые интегральные характеристики определяются направляющими косинусами нормалей к элементам триангуляционной модели (рис. 1).

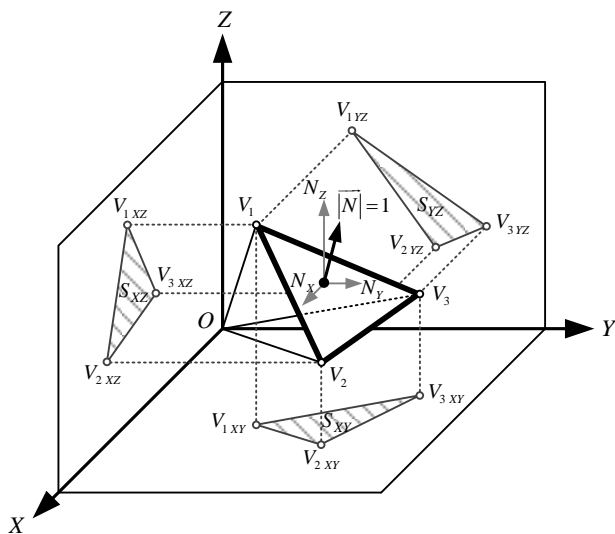


Рисунок 1 – Единичный элемент триангуляционной 3D модели.

К абсолютным характеристикам относятся минимальные N_{Xmin} , N_{Ymin} ,

N_{Zmin} , максимальные N_{Xmax} , N_{Ymax} , N_{Zmax} значения и величины интервалов значений R_{NX} , R_{NY} , R_{NZ} :

$$\begin{aligned} N_{Xmin} &= \text{MIN}(N_{X(i)}); & N_{Ymin} &= \text{MIN}(N_{Y(i)}); & N_{Zmin} &= \text{MIN}(N_{Z(i)}); \\ N_{Xmax} &= \text{MAX}(N_{X(i)}); & N_{Ymax} &= \text{MAX}(N_{Y(i)}); & N_{Zmax} &= \text{MAX}(N_{Z(i)}); \\ R_{NX} &= N_{Xmax} - N_{Xmin}; & R_{NY} &= N_{Ymax} - N_{Ymin}; & R_{NZ} &= N_{Zmax} - N_{Zmin}. \end{aligned} \quad (3)$$

3. Поверхностные интегральные характеристики

Абсолютные поверхностные интегральные характеристики базируются на площадях составляющих треугольников триангуляционной модели, их проекциях на координатные плоскости и описывающем параллелепипеде:

• Площадь триангуляционной 3D модели S_{TXYZ} может быть вычислена по следующей зависимости:

$$S_{TXYZ} = \sum_{i=1}^{N_{Face}} S_i, \quad (4)$$

где S_i – площадь i -го треугольника с вершинами $V_{1,i}(x_{1,i}; y_{1,i}; z_{1,i})$, $V_{2,i}(x_{2,i}; y_{2,i}; z_{2,i})$, $V_{3,i}(x_{3,i}; y_{3,i}; z_{3,i})$.

Определение площадей S_i производится с учетом [6] по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} S_i &= \frac{1}{2} \sqrt{S_{Minor1(i)}^2 + S_{Minor2(i)}^2 + S_{Minor3(i)}^2}; \\ S_{Minor1(i)} &= \begin{vmatrix} y_{2,i} - y_{1,i} & z_{2,i} - z_{1,i} \\ y_{3,i} - y_{1,i} & z_{3,i} - z_{1,i} \end{vmatrix} = \\ &= y_{2,i} z_{3,i} - y_{2,i} z_{1,i} - y_{1,i} z_{3,i} + y_{1,i} z_{2,i} + y_{1,i} z_{2,i} + y_{3,i} z_{1,i}; \\ S_{Minor2(i)} &= - \begin{vmatrix} x_{2,i} - x_{1,i} & z_{2,i} - z_{1,i} \\ x_{3,i} - x_{1,i} & z_{3,i} - z_{1,i} \end{vmatrix} = \\ &= x_{2,i} z_{3,i} - x_{2,i} z_{1,i} - x_{1,i} z_{3,i} + x_{1,i} z_{2,i} + x_{1,i} z_{2,i} + x_{3,i} z_{1,i}; \\ S_{Minor3(i)} &= \begin{vmatrix} x_{2,i} - x_{1,i} & y_{2,i} - y_{1,i} \\ x_{3,i} - x_{1,i} & y_{3,i} - y_{1,i} \end{vmatrix} = \\ &= x_{2,i} y_{3,i} - x_{2,i} y_{1,i} - x_{1,i} y_{3,i} + x_{1,i} y_{2,i} + x_{1,i} y_{2,i} + x_{3,i} y_{1,i}; \end{aligned} \quad (5)$$

• Площади проекций всех треугольников триангуляционной модели S_{TXY} , S_{TXZ} , S_{TYZ} , состоящей из N_{Face} треугольников, на соответствующие координатные плоскости определяется зависимостями:

$$S_{TXY} = \sum_{i=1}^{N_{Face}} S_{iXY}; \quad S_{TXZ} = \sum_{i=1}^{N_{Face}} S_{iXZ}; \quad S_{TYZ} = \sum_{i=1}^{N_{Face}} S_{iYZ}, \quad (6)$$

где S_{iXY} , S_{iXZ} , S_{iYZ} – площади проекции i -го треугольника на соответствующие

координатные плоскости.

Для получения проекции треугольника на координатные плоскости, координаты его вершин по ортогональной оси для зависимостей (5) принимаются равными 0. Полученное значение является площадью проекции треугольника на соответствующую координатную плоскость (рис. 1).

• Площади граней параллелепипеда описанного вокруг триангуляционной 3D модели S_{XY} , S_{XZ} , S_{YZ} определяются по следующим зависимостям:

$$S_{XY} = L_X L_Y; \quad S_{XZ} = L_X L_Z; \quad S_{YZ} = L_Y L_Z, \quad (7)$$

где L_X , L_Y , L_Z – интервалы значений по соответствующим координатным осям;

• Площадь поверхности описывающего параллелепипеда S_{XYZ} определяется следующей зависимостью:

$$S_{XYZ} = 2(S_{XY} + S_{XZ} + S_{YZ}), \quad (8)$$

где S_{XY} , S_{XZ} , S_{YZ} – площади ортогональных граней описывающего параллелепипеда.

В качестве относительных поверхностных интегральных характеристик целесообразно принять следующие безразмерные коэффициенты:

• относительные коэффициенты k_{STXY} , k_{STXZ} , k_{STYZ} (отношение площадей проекций всех треугольников триангуляционной модели S_{TXY} , S_{TXZ} , S_{TYZ} к площадям соответствующих граней описывающего параллелепипеда S_{XY} , S_{XZ} , S_{YZ}) определяемые отношениями:

$$k_{STXY} = \frac{S_{TXY}}{2S_{XY}}; \quad k_{STXZ} = \frac{S_{TXZ}}{2S_{XZ}}; \quad k_{STYZ} = \frac{S_{TYZ}}{2S_{YZ}}; \quad (9)$$

• относительный коэффициент k_{STXYZ} (отношение площади поверхности триангуляционной модели S_{TXYZ} к площади поверхности описывающего параллелепипеда S_{XYZ}) определяется отношением:

$$k_{STXYZ} = \frac{S_{TXYZ}}{S_{XYZ}}. \quad (10)$$

4. Объемные интегральные характеристики

Объемные абсолютные интегральные характеристики базируются на объемах триангуляционной модели и описывающего параллелепипеда.

Для вычисления объема триангуляционной 3D модели [9] необходимо выбрать в пространстве исходную точку O^* в качестве которой может служить начало системы координат $O(0; 0; 0)$. Для каждой треугольной грани модели строится тетраэдр $T_{(i)}$ с вершиной в точке O^* (рис. 1). Для каждого тетраэдра определяется его объем $V_{T(i)}$. Общим объемом триангуляционной модели будет сумма объемов тетраэдров $V_{T(i)}$.

• Объем триангуляционной модели V_{TXYZ} , состоящей из N_{Face} треугольников, определяется зависимостью:

$$V_{TXYZ} = \sum_{i=1}^{N_{Face}} V_{T(i)}, \quad (11)$$

где $V_{T(i)}$ – объем тетраэдра, образованного i -ой треугольной гранью модели (основание тетраэдра) $V_{1,i}(x_{1,i}; y_{1,i}; z_{1,i})$, $V_{2,i}(x_{2,i}; y_{2,i}; z_{2,i})$, $V_{3,i}(x_{3,i}; y_{3,i}; z_{3,i})$ и вершиной в исходной точке $O^*(x; y; z)$, определяется по формуле [6]:

$$V_{T(i)} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_{1,i} - x & y_{1,i} - y & z_{1,i} - z \\ x_{2,i} - x & y_{2,i} - y & z_{2,i} - z \\ x_{3,i} - x & y_{3,i} - y & z_{3,i} - z \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Для начальной точки соответствующей началу координат $O^*(0; 0; 0)$ зависимость (12) после упрощения примет удобный для практических расчетов вид:

$$V_{T(i)} = -x_{1,i}y_{2,i}z_{3,i} + x_{1,i}y_{3,i}z_{2,i} + x_{2,i}y_{1,i}z_{3,i} - x_{2,i}y_{3,i}z_{1,i} + \\ + x_{3,i}y_{1,i}z_{2,i} + x_{3,i}y_{2,i}z_{1,i}; \quad (13)$$

• Объем описывающего параллелепипеда V_{XYZ} , определяется зависимостью:

$$V_{XYZ} = L_X L_Y L_Z, \quad (14)$$

где L_X, L_Y, L_Z – интервалы значений по координатным осям.

• Относительный коэффициент объема триангуляционной модели k_{VTXYZ} имеет область значений $(0, 1]$ (отношение объема триангуляционной модели V_{TXYZ} к объему описывающего параллелепипеда V_{XYZ}) и определяется отношением:

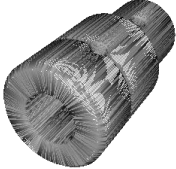

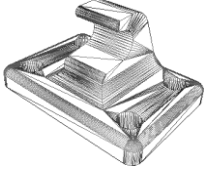
$$k_{VTXYZ} = \frac{V_{TXYZ}}{V_{XYZ}}. \quad (15)$$

Тестирование предложенных интегральных характеристик выполнялось на трех триангуляционных 3D моделях изделий: втулка, сопло и анкер. Для каждой группы интегральных характеристик определялись абсолютные и относительные значения (табл. 1). Анализ предложенных зависимостей и результаты тестирования позволяет дать оценку целесообразности использования интегральных характеристик.

Абсолютные интегральные характеристики позволяют получить количественную оценку геометрии триангуляционных моделей:

• Линейные интегральные характеристики определяют пространственное положение и размеры модели. В интегрированных генеративных технологиях материализация моделей происходит на специальных установках, которые имеют определенные ограничения по габаритным размерам изготавливаемых изделий.

Таблица 1 – Интегральные характеристики тестовых триангуляционных 3D моделей

Модель	Втулка	Сопло	Анкер
Характеристики			
<i>Линейные (координаты вершин)</i>			
Минимальное x_{min} и максимальное x_{max} значения координат по оси X , мм	$1,000000 \cdot 10^1$ $7,500000 \cdot 10^1$	$1,000000 \cdot 10^1$ $6,528695 \cdot 10^2$	$1,000000 \cdot 10^1$ $8,937500 \cdot 10^1$
Минимальное y_{min} и максимальное y_{max} значения координат по оси Y , мм	$1,000000 \cdot 10^1$ $4,300000 \cdot 10^1$	$1,000000 \cdot 10^1$ $5,527542 \cdot 10^2$	$1,000000 \cdot 10^1$ $6,715000 \cdot 10^1$
Минимальное z_{min} и максимальное z_{max} значения координат по оси Z , мм	$0,000000 \cdot 10^0$ $3,300000 \cdot 10^1$	$0,000000 \cdot 10^0$ $3,641697 \cdot 10^2$	$0,000000 \cdot 10^0$ $4,152770 \cdot 10^1$
Величины интервалов значений координат L_X , L_Y , L_Z по осям координат, мм	$6,500000 \cdot 10^1$ $3,300000 \cdot 10^1$ $3,300000 \cdot 10^1$	$6,428695 \cdot 10^2$ $6,427542 \cdot 10^2$ $3,641697 \cdot 10^2$	$7,937500 \cdot 10^1$ $5,715000 \cdot 10^1$ $4,152770 \cdot 10^1$
Относительные коэффициенты k_X , k_Y , k_Z (отношения минимальных значений координат к максимальным)	$0,133333 \cdot 10^0$ $0,232558 \cdot 10^0$ $0,000000 \cdot 10^0$	$0,015316 \cdot 10^0$ $0,018091 \cdot 10^0$ $0,000000 \cdot 10^0$	$0,111888 \cdot 10^0$ $0,148920 \cdot 10^0$ $0,000000 \cdot 10^0$
<i>Угловые (направляющие косинусы нормалей)</i>			
Минимальное $N_{X_{min}}$ и максимальное $N_{X_{max}}$ значения направляющих косинусов нормали относительно оси X	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$
Минимальное $N_{Y_{min}}$ и максимальное $N_{Y_{max}}$ значения направляющих косинусов нормали относительно оси Y	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$
Минимальное $N_{Z_{min}}$ и максимальное $N_{Z_{max}}$ значения направляющих косинусов нормали относительно оси Z	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$	$-1,000000 \cdot 10^0$ $1,000000 \cdot 10^0$
Величины интервалов значений R_{N_X} , R_{N_Y} , R_{N_Z} направляющих косинусов	$2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$	$2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$	$2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$ $2,000000 \cdot 10^0$

Продолжение табл. 1

<i>Поверхностные</i>			
Площадь поверхности триангуляционной модели S_{TXYZ} , $мм^2$	$1,075695 \cdot 10^4$	$1,426765 \cdot 10^6$	$1,448398 \cdot 10^4$
Площади проекций всех треугольников триангуляционной модели S_{TXY} , S_{TXZ} , S_{TYZ} на координатные плоскости, $мм^2$	$6,033963 \cdot 10^3$ $5,618441 \cdot 10^3$ $1,958196 \cdot 10^3$	$6,210219 \cdot 10^5$ $6,395387 \cdot 10^5$ $6,396228 \cdot 10^5$	$8,931481 \cdot 10^3$ $3,746582 \cdot 10^3$ $3,420779 \cdot 10^3$
Площади граней описывающего параллелепипеда S_{XY} , S_{XZ} , S_{YZ} , $мм^2$	$2,145000 \cdot 10^3$ $2,145000 \cdot 10^3$ $1,089000 \cdot 10^3$	$4,132071 \cdot 10^5$ $2,341136 \cdot 10^5$ $2,340716 \cdot 10^5$	$4,536281 \cdot 10^3$ $3,296261 \cdot 10^3$ $2,373308 \cdot 10^3$
Площадь поверхности описывающего параллелепипеда S_{XYZ} , $мм^2$	$1,075800 \cdot 10^4$	$1,762785 \cdot 10^6$	$2,041170 \cdot 10^4$
Относительные коэффициенты k_{STXY} , k_{STXZ} , k_{STYZ} (отношения площадей проекций всех треугольников триангуляционной модели к площадям соответствующих граней описывающего параллелепипеда)	$1,406518 \cdot 10^0$ $1,309660 \cdot 10^0$ $0,899080 \cdot 10^0$	$0,751466 \cdot 10^0$ $1,365873 \cdot 10^0$ $1,366297 \cdot 10^0$	$0,984450 \cdot 10^0$ $0,568308 \cdot 10^0$ $0,720677 \cdot 10^0$
Относительный коэффициент k_{STXYZ} (отношение площади поверхности триангуляционной модели к площади поверхности описывающего параллелепипеда)	$0,999902 \cdot 10^0$	$0,809381 \cdot 10^0$	$0,709592 \cdot 10^0$
<i>Объемные</i>			
Объем триангуляционной модели V_{TXYZ} , $мм^3$	$3,374291 \cdot 10^4$	$7,590176 \cdot 10^6$	$5,736910 \cdot 10^4$
Объем описывающего параллелепипеда V_{XYZ} , $мм^3$	$7,078500 \cdot 10^4$	$1,504775 \cdot 10^8$	$1,883813 \cdot 10^5$
Относительный коэффициент k_{VTXYZ} (отношение объема триангуляционной модели к объему описывающего параллелепипеда)	$0,476696 \cdot 10^0$	$0,504406 \cdot 10^{-1}$	$0,304537 \cdot 10^0$

• Угловые интегральные характеристики позволяют определить интервал значений направляющих косинусов нормалей к граням триангуляционной модели;

• Поверхностные интегральные характеристики позволяют оценить

площадь поверхности модели, проекции на координатные плоскости и площадь поверхности описывающего параллелепипеда;

- Объемные интегральные характеристики позволяют количественно оценить объем исходного материала, требуемого при материализации модели.

Относительные интегральные характеристики дают возможность сравнительного анализа триангуляционных 3D моделей:

- Линейные интегральные характеристики определяют степень разброса координат вершин граней триангуляционной модели по осям координат;

- Поверхностные интегральные характеристики определяют степень сложности поверхности триангуляционной модели по отношению к описывающему прямоугольному параллелепипеду (предельный случай). Увеличение значения характеристики свидетельствует о степени сложности поверхности триангуляционной модели;

- Объемная интегральная характеристика определяет степень заполнения триангуляционной моделью описывающего параллелепипеда.

Выводы

Предложенная система интегральных характеристик триангуляционных 3D моделей может быть использована при решении задач морфологического анализа на этапе подготовки к материализации изделий интегрированными генеративными технологиями.

Результаты работы создают методологическую основу для последующего углубленного изучения триангуляционных моделей при оценке технологичности изделий и выборе рационального метода материализации.

Рассмотренные подходы использованы в системе морфологического анализа триангуляционных 3D моделей изделий, разрабатываемой кафедрой «Интегрированные технологии машиностроения» им. М.Ф. Семко Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Список использованных источников: 1. *Dean A.* STL-формат для быстрого прототипирования. Часть I. Вывод в формате STL / *A. Dean* // CAD/CAM/CAE Observer. - 2005. - № 5(23). - С. 64-69. 2. *Голованов Н.Н.* Геометрическое моделирование / *Н.Н. Голованов*. - М.: Изд-во Физ.-мат. лит., 2002. - 472 с. 3. *Доброскок В.Л.* Особенности описания 3D образов изделий STL-файлами / *В.Л. Доброскок, Л.Н. Абдурайимов, Я.Н. Гаращенко* // Високі технології в машинобудуванні: 36. наук. пр. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. - Вип. 1(12). - С. 159-164. 4. *Дружинский И.А.* Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник / *Дружинский И.А.* - Л.: Машиностроение, 1985. - 263 с. 5. Интегрированные технологии ускоренного прототипирования и изготовления : монография / [*Товажнянский Л.Л., Грабченко А.И., Чернышов С.И.* и др.]; под. ред. Л.Л. Товажнянского, А.И. Грабченко. - [2-е изд.]. - Харьков: ОАО «Мо-

дель Вселенной», 2005. – 224 с. **6.** Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с. **7.** Коришунов А.И. Введение в теорию конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения / А.И. Коришунов // □ Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 66-67. **8.** Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории / Радзевич С.П. – К.: Растан, 2001. – 592 с. **9.** Сабитов И.Х. Объемы многогранников / Сабитов И.Х. – М.: МЦНМО, 2002. – 32 с. **10.** Технологичность конструкции изделия: Справочник / Под ред. Ю.Д. Аморова. – М.: Машиностроение, 1990. – 768 с. **11.** Технологичность конструкций изделий: Справочник / Т.К. Алферова, Ю.Д. Аморов, П.Н. Волков и др.; Под ред. Ю.Д. Аморова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с. **12.** Bohn J.H. File format requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow / J.H. Bohn // Int. Conf. on Manuf. Automation (April 28-30). – Hong Kong: University of Hong Kong. – 1997. – Vol. 2. – P. 878-883. **13.** Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling / Jacobs P.F. – New York: ASME Press, 1996. – 392 p. **14.** Petik A. Some aspects of using STL file format in CAE systems / A. Petik // CA Systems in Production Process Planning. – 2002. – P. 80-86.

Поступила в редколлегию 29.04.2011

Bibliography (transliterated): 1. Dean A. STL-format dlja bystrogo prototipirovanija. Chast' I. Vывод v formate STL / A. Dean // CAD/CAM/CAE Observer. – 2005. – № 5(23). – S. 64-69. 2. Golovanov N.N. Geometricheskoe modelirovanie / N.N. Golovanov. – М.: Izd-vo Fiz.-mat. lit., 2002. – 472 s. 3. Dobroskok V.L. Osobennosti opisanija 3D obrazov izdelij STL-fajlami / V.L. Dobroskok, L.N. Abdurajimov, Ja.N. Garawenko // Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: Zb. nauk. pr. – Harkiv: NTU "HPI". – 2006. – Vip. 1(12). – S. 159-164. 4. Druzhinskij I.A. Slozhnye poverhnosti: Matematicheskoe opisanie i tehnologicheskoe obespechenie: Spravochnik / Druzhinskij I.A. – L.: Mashinostroenie, 1985. – 263 s. 5. Integrirovannye tehnologii uskorennoho prototipirovanija i izgotovlenija : monografija / [Tovazhnjanskij L.L., Grabchenko A.I., Chernyshov S.I. i dr.]; pod. red. L.L. Tovazhnjanskogo, A.I. Grabchenko. – [2-e izd.]. – Har'kov: OAO «Model' Vselennoj», 2005. – 224 s. 6. Korn G. Spravochnik po matematike (dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov) / G. Korn, T. Korn. – М.: Nauka, 1977. – 832 s. 7. Korshunov A.I. Vvedenie v teoriju konstruktivno-tehnologicheskoy slozhnosti izdelij mashinostroenija / A.I. Korshunov // Sovremennye naukoemkie tehnologii. – 2004. – № 2. – S. 66-67. 8. Radzevich S.P. Formoobrazovanie poverhnostej detalej. Osnovy teorii / Radzevich S.P. – К.: Rastan, 2001. – 592 s. 9. Sabitov I.H. Ob#emy mnogogrannikov / Sabitov I.H. – М.: MCNMO, 2002. – 32 s. 10. Tehnologichnost' konstrukcii izdelija: Spravochnik / Pod red. Ju.D. Amirova. – М.: Mashinostroenie, 1990. – 768 s. 11. Tehnologichnost' konstrukcij izdelij: Spravochnik / T.K. Alferova, Ju.D. Amirov, P.N. Volkov i dr.; Pod red. Ju.D. Amirova. – М.: Mashinostroenie, 1985. – 368 s. 12. Bohn J.H. File format requirements for the Rapid Prototyping Technologies of Tomorrow / J.H. Bohn // Int. Conf. on Manuf. Automation (April 28-30). – Hong Kong: University of Hong Kong. – 1997. – Vol. 2. – P. 878-883. 13. Jacobs P.F. Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling / Jacobs P.F. – New York: ASME Press, 1996. – 392 p. 14. Petik A. Some aspects of using STL file format in CAE systems / A. Petik // CA Systems in Production Process Planning. – 2002. – P. 80-86.